

ประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลของ Bluetooth ภายใต้การรบกวน
ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 800 MHz

THE PERFORMANCE OF BLUETOOTH™ TRANSMISSIONS IN ELECTROMAGNETIC
INTERFERENCE ENVIRONMENT FROM THE 800 MHz MOBILE PHONE

นายจักรพล สันติยานนท์

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

พ.ต.ดร.เศรษฐพงศ์ มะลิสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการแสดงถึงความน่าจะเป็นของการสูญเสียแพ็คเกจข้อมูลในการสื่อสารของ Bluetooth จากผลกระทบของพลังงานคลื่นไมโครเวฟ (ประมาณ 2.45 GHz) จากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz และผลกระทบจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz นั้นเราจะศึกษาถึงการทำงานของ การส่งข้อมูลของ Bluetooth โดยคำนวณหาจากการศึกษาแบบจำลองการสื่อสารตามระบบการทำงานของ Bluetooth ภายใต้การรบกวนจากคลื่นไมโครเวฟ

A systematic analysis is presented to calculate the packet-loss probability in the Bluetooth™ transmissions impaired by Electromagnetic Interference (EMI) from the 3rd harmonic of 800 MHz mobile phone. Considerations of GFSK modulation adopted are duly taken into account. The effects of EM radiation from the 3rd harmonic of 800 MHz mobile phone in the transmission mode on the relevant performance impairment are determined. Simulation studies on Bluetooth™ communications consistent with the available details pertinent to EMI from the mobile phone are presented, and, relevant conclusions on the interference involved are elucidated.

คำสำคัญ : Bluetooth, EMI, Frame-Error-Rate

1. บทนำ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นหลักหัวข้องานวิจัยที่สำคัญของการสื่อสารของ Bluetooth คือการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีผลมาจากการสูญเสียคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของ carrier frequency ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ซึ่งมีผลต่อการทำงานในช่วงที่อุปกรณ์ Bluetooth อยู่ในช่วงแอ็คทีฟ เนื่องมาจากผลกระทบดังกล่าวจะมีผลต่อการลดประสิทธิภาพในการสื่อสารแบบไร้สาย เพราะจะทำให้ลดประสิทธิภาพในการทำงานของระบบการสื่อสารของ Bluetooth เนื่องมาจากผลของการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ในช่วงตำแหน่งแอดเดรสเดียวกัน

เทคโนโลยี Bluetooth เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สัญญาณความถี่วิทยุในช่วง 2.4 GHz โดยใช้ในการสื่อสารระยะสั้นในการทำงานนั้นจะใช้การใช้ช่องสัญญาณร่วมกันของอุปกรณ์ Bluetooth 2 ตัวหรือมากกว่าที่เรียกว่าพีโคเน็ต โดยพีโคเน็ต(piconet)นั้นจะมีอุปกรณ์ที่แสดงตัวเป็นมาสเตอร์(master)และอุปกรณ์ตัวอื่นแสดงตัวเป็นสเลฟ(slave) ซึ่งการส่งสัญญาณจะสามารถส่งได้ทั้งแบบจุดต่อจุด(point-to-point) เมื่อมีอุปกรณ์ Bluetooth เพียงแค่ 2 ตัวหรือ แบบจุดต่อหลายจุด (point-to- multipoint) เมื่ออุปกรณ์ Bluetooth มากกว่า 2 ตัว คือโทโพโลยี(topology) ของหลายๆ พีโคเน็ตที่มีการทำงานเหลื่อมทับกันของพื้นที่การทำงาน โดยปราศจากการรบกวนของแต่ละอุปกรณ์ Bluetooth เราจะเรียกว่า สแก็ตเตอร์เน็ต

การทำงานของโครงข่าย Bluetooth จะประกอบขึ้นบนหลักการทำงานของเทคนิคการกระโดดช่วงความถี่ (frequency hopping technique) ด้วยการจัดลำดับสำหรับแต่ละพีโคเน็ตโดยจะมีการป้องกันการรบกวนจากแต่ละพีโคเน็ตที่อื่นๆที่อยู่ข้างเคียง จึงมีการนำการใช้การเลือกการกระโดดช่วงความถี่นำมาใช้ (frequency hop-selection) โดยจะมีการจัดหรือสุ่มความถี่ที่จะใช้งาน(carrier frequencies) โดยช่วงความถี่ที่เลือกจะต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดและจะใช้ส่งแพ็คเก็ตในความถี่ที่เลือกและจะสุ่มการกระโดดของความถี่สำหรับการส่งแต่ละครั้ง รูปแบบของการกระโดดของความถี่จะคำนวณจากตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่แสดงตัวเป็นมาสเตอร์ โดยจะใช้กับมาสเตอร์สำหรับแต่ละพีโคเน็ตและสัญญาณเวลาของเหตุการณ์ในการส่ง ซึ่งจะมีช่วงความถี่ที่ใช้งานอยู่ 10 ช่วง โดยจะแบ่งเป็น 5 ช่วงความถี่สำหรับระบบ 79 hop (ใช้ในสหรัฐอเมริกา, ยุโรป และประเทศอื่นๆ) และ 5 ช่วงความถี่สำหรับระบบที่เป็น 23 hop (ใช้ในญี่ปุ่น, สเปน และฝรั่งเศส อย่างไรก็ตามคาดว่าประเทศเหล่านี้จะปรับมาใช้ระบบ 79 hop ในระยะเวลาอันใกล้นี้) โครงสร้างในการเลือกจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1) ลำดับการเลือก 2) การ mapping โดยจะมีการลำดับตามช่วงความถี่ (hop frequency) โดยทั่วไปบล็อกไดอะแกรมของผังการเลือกช่วงความถี่(hop-selection scheme) โดยที่จะ mapping จากอินพุทของช่วงความถี่ hop frequency ในการดำเนินการในกล่องการเลือก(selection box) โดยการกำหนดอัตราช่วงกระโดด (hoprate) คือ 1,600 hop/s ดังนั้นช่วงระยะเวลาของความห่างของแต่ละ hop คือ 625 ไมโครวินาที(μ s) ในช่วงคาบเวลา บิทข้อมูลจะถูกส่งให้ตรงกับลำดับของช่วงสัญญาณที่ปรับขึ้นมาในรูปแบบของการสุ่มทั้งตัวส่งและตัวรับจะใช้การกระโดดที่เหมือนกันโดยปรับให้ตรงกับช่วงสัญญาณที่มีสัญญาณนาฬิกาตรงกัน

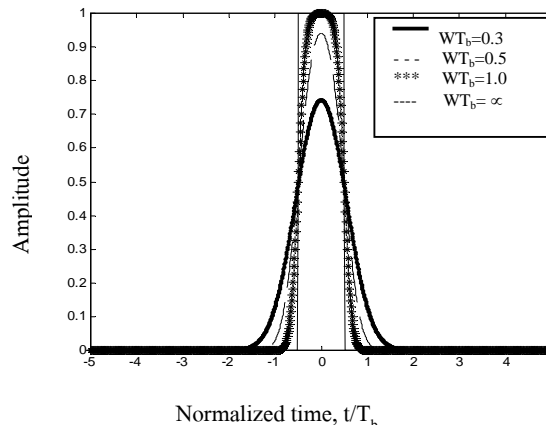
รูปแบบของบล็อกไดอะแกรมของคลื่นวิทยุที่ใช้ใน Bluetooth จะใช้ความถี่ช่วงกระโดดและการมอดูเลตแบบจีเอฟเอสเค(GFSK modulation) ในโหมดการส่งข้อมูล ข้อมูลเลขฐาน 2 (binary data) จะถูกส่งเข้าสู่ modulator โดยการใช้ GFSK scheme ซึ่งผลของการ modulation จะอยู่ที่ประมาณศูนย์กลางของความถี่หลัก ต่อจากนั้นก็จะเลือกความถี่จาก hop-selection box แล้ว modulated กับสัญญาณเอาท์พุทที่มาจาก GFSK modulator แล้วจะ shift สัญญาณไปที่ประมาณศูนย์กลางของ selected hop frequency ส่วนทางด้านตัวรับ จะมี frequency-hopped spread-spectrum signal คือ pre-demodulated จะใช้หลักการเดียวกัน hop - frequency ที่ใช้ด้านตัวส่ง แล้วจะถูกส่งเข้าสู่ BFSK demodulation ดังนั้นข้อมูลเลขฐานสอง(binary data) จะถูกกู้คืนกลับมาที่ด้านสุดท้ายของเอาท์พุท

2. ความน่าจะเป็นในความผิดพลาดสำหรับ GFSK modulation

จากการที่ Bluetooth radio chip ใช้การ modulation แบบ GFSK modulation ด้วยค่า modulation index ระหว่าง 0.28–0.35 สำหรับการรักษาความสมดุลของผลกระทบของการรบกวนในช่วงความถี่ ระหว่างบิตที่เป็น “0” และ บิตที่เป็น “1” และ ค่า WT_b factor ของ gaussian filter ที่ 0.5 โดยที่ในการ modulation แบบ GFSK นั้นเกือบจะคล้ายกับการ modulation แบบ FSK สิ่งที่แตกต่างกันของการ modulation นั้นก็คือ ก่อนที่ baseband pulse จะเข้าสู่ FSK modulator นั้นมันจะผ่าน Gaussian filter ก่อน ซึ่ง Gaussian filter จะทำให้รูปร่างของ pulse ถูกจำกัด ก็คือ spectral width นั้นเอง โดยที่ pulse shaping filter ควรจะมีการแก้ไขคุณสมบัติต่างๆดังนี้ คือทำให้ Frequency responses มี bandwidth ที่แคบ และ คุณลักษณะของ sharp cutoff ซึ่งควรจะต้องตัดส่วนที่มีความถี่สูง(high-frequency)ของสัญญาณที่จะทำการส่งออกไป และควรที่จะทำให้ impulse response สามารถหลีกเลี่ยง low overshoot ที่จะเกิดขึ้นในความถี่ของสัญญาณแบบ FM

ดังนั้น response $g(t)$ ของฟิลเตอร์ จะถูกกำหนดโดย Gaussian transfer function และในการอ้างอิงถึง rectangular pulse ของ unit amplitude และ ช่วงระยะเวลาของ T_b (ศูนย์กลางบนจุดกำเนิด) โดยที่ $g(t)$ จะหาได้จาก

$$g(t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\log 2}} WT_b \left(\frac{t}{T_b} - \frac{1}{2} \right) \right) - \operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\log 2}} WT_b \left(\frac{t}{T_b} + \frac{1}{2} \right) \right) \right] \quad (1)$$



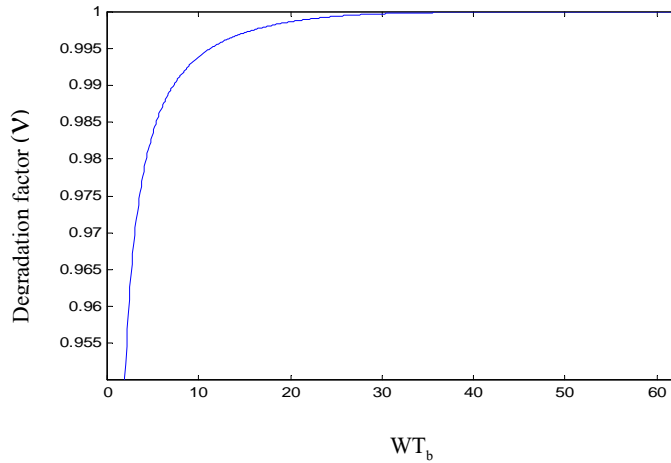
รูปที่ 1 Frequency-shaping pulse $g(t)$ ซึ่งได้จาก สมการที่ 1 โดยการเปลี่ยนค่า WT_b ,

โดยสิ่งที่สำคัญนั่นก็คือ pulse response จะต้องสามารถทำให้รูปร่างความถี่ของ rectangular pulse ที่ GFSK modulator มีขนาดน้อยมาก นั่นก็คือว่าจะต้องทำให้ time-bandwidth ผลิตค่า WT_b ที่เป็นไปตามกฎของค่าตัวแปรที่ออกแบบ ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 สามารถสังเกตได้ว่า rectangular ที่ผ่าน gaussian filter จะยืดกว้างออก ดังนั้นจะทำให้ค่า bit duration time $(-T_b/2$ ถึง $T_b/2)$ ซึ่งจะหมายถึงว่าค่า bit energy bounded ระหว่าง $-T_b/2$ ถึง $T_b/2$ นั้นจะกำหนดขอบเขตของการยืดออก ดังนั้นขณะที่ทำการหาค่าพลังงานของสัญญาณนั้น สัญญาณควรจะถูกจำกัด time boundary ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็น ส่วนค่า degradation factor (V) สามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ออกมาจาก gaussian filter ในช่วงของ $-T_b/2$ ถึง $T_b/2$ และ original bit energy ของ rectangular pulse ซึ่งจะหาได้จาก:

$$v = \frac{\int_{-T_b/2}^{T_b/2} g(t)^2 dt}{E_b / N_0} \quad (2)$$

สิ่งที่แสดงให้เห็นคือ WT_b จะเป็นค่าตัวแปรสำหรับ Gaussian filter โดยที่ degradation factor สามารถกำหนดได้จากเทอมของ WT_b ดังแสดงในรูปที่ 2 คือค่าต่างของ V นั่นก็คือฟังก์ชัน ของ WT_b



รูปที่ 2 Degradation factor (V) ในสมการที่ 4.2 ที่แปรตามค่า WT_b

ในการหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดของบิตโดยจะอ้างอิงถึงโครงสร้างการทำงานของ GFSK นั้น ก็จะเป็น BER (P) ที่พัฒนามาจาก FSK โดยการปรับปรุงสมการดังนี้

$$P_e = Q(a, b) - \frac{1}{2} e^{-(a^2+b^2)/2} I_0(ab) \quad (3)$$

โดยที่

$$a = \sqrt{\frac{v E_b / N_0}{2} (1 - \sqrt{1 - |p|^2})}; \quad b = \sqrt{\frac{v E_b / N_0}{2} (1 + \sqrt{1 - |p|^2})}$$

$$|p| = \left| \frac{\sin(\pi t \Delta f)}{\pi t \Delta f} \right| = \left| \frac{\sin(\pi h)}{\pi h} \right|$$

h is modulation index ;

Q(a,b) : Marcum's Q-function; และ $I_0(a,b)$: Modified Bessel function of order zero.

จากสมการที่ 3 เราจะปรับปรุงสมการดังนี้

โดยการทำตามหลักของ Proakis [3] โดยที่เราจะกำหนดให้ modulation index เท่ากับ 1 และให้ $WT_b \rightarrow \infty$ ทำให้ BER (P) มีความเหมือนกับสถานะของ FSK เพราะฉะนั้นจะได้ $\frac{1}{2} \exp[-(E_b / N_0)/2]$ จากนั้นจึงนำค่าต่างๆนี้ไปแทนค่าในสมการที่ 3 ซึ่งจะทำให้ $WT_b \rightarrow \infty$ (or $V = 1$), $h = 1$ (or $|p| = 0$), $a = 0$ และ $b = \sqrt{E_b / N_0}$ จะทำให้ได้ $Q(0,b) = e^{-b^2/2}$ and $I(0) = 1$. เพราะฉะนั้นจะทำให้สมการที่ 3 ลดรูปเหลือดังนี้

$$P_e = e^{-b^2/2} - (1/2)e^{-b^2/2} = (1/2)e^{-\frac{E_b / N_0}{2}} \quad (4)$$

3. อัตราความผิดพลาดของเฟรมข้อมูลใน ACL Packets ของการสื่อสารของBluetooth Packets ต่างๆ ของ Bluetooth จะมี 7 รูปแบบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 :ACL Packets ของการสื่อสารของ BluetoothTM

Type	Maximum overall packet size (Bits)	FEC	CRC
DM1	240	2/3	Yes
DM1	240	No	Yes
DM3	1500	2/3	Yes
DM3	1496	No	Yes
DM5	2736	2/3	Yes
DM5	2744	No	Yes
AUX1	240	No	No

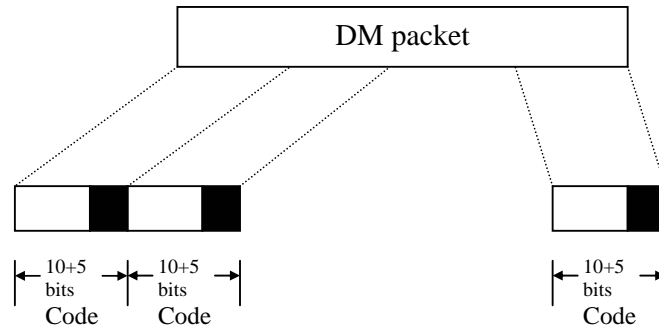
ในแพ็คเกจชนิด AUX 1 นั้นจะไม่มี FEC และ CRC นั้นจะหมายความว่ามันจะไม่มีคุณสมบัติในการทำ error correction และ/หรือการทำ detection เพราะฉะนั้นแพ็คเกจนั้นจะถูกทิ้งเมื่อมีเพียงหนึ่งบิตเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น สำหรับแพ็คเกจชนิด DH1, DH3, และ DH5 จะมี 16 CRC bits รวมอยู่ใน packet แต่ว่า CRC bits เหล่านี้จะสามารถตรวจสอบความผิดพลาดได้ก็ต่อเมื่อมีการผ่าน ARQ scheme และจะไม่มีการทำ error correction. ดังนั้นทั้งแพ็คเกจชนิด AUX และ DH จะไม่มีคุณสมบัติในการทำ error correction ดังนั้น packets เหล่านี้จะถูกทิ้ง เมื่อมีเพียงหนึ่งบิตเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยจะแสดงความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของ packet โดยจะกำหนดในเทอมของ

$$FER=1-(1-P_c)^n \quad (5)$$

โดยที่ P_c คือ Probability of bit error rate

และ n คือ number of bit in a AUXI or DH packet

ส่วนในแพ็คเกจชนิด DM ใน information payload จะมีการเพิ่ม CRC bits เข้าไป ซึ่งจะเป็น code ที่มีอัตราเท่ากับ 2/3 FEC และเพิ่ม 5 พาริตีบิตทุกๆ 10 bit segment codeword โดยที่ code นี้สามารถที่จะแก้ไขบิตที่ผิดพลาดในแต่ละ codeword ได้ โดยจะเริ่มตั้งแต่การเข้ารหัสให้กับ information segments ที่มีความยาว 10 บิตและส่วนบิตท้ายจะเพิ่มค่าที่เป็นศูนย์เข้าไปหลังจาก CRC บิตซึ่งจะเป็นผลรวมทั้งหมดของการเข้ารหัส



รูปที่ 3 โครงสร้างของแพ็กเกจชนิด DM

ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในแพ็กเกจชนิด DM ที่แต่ละ codeword จะมีคุณสมบัติในการแก้ไขข้อผิดพลาดของบิตที่ผิดพลาดจะกำหนดโดย

$$P_c = 1 - \sum_{k=0}^l \binom{15}{k} P_e^k (1 - P_e)^{15-k} \quad (6)$$

โดยที่ P_e คือ the probability of bit error rate

และ P_c คือ probability of codeword error rate

ความสัมพันธ์ของ probability of packet error rate จะกำหนดโดย

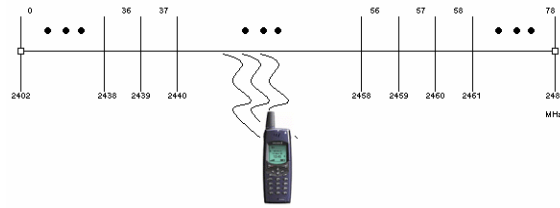
$$FER = 1 - (1 - P_c)^m \quad (7)$$

โดยที่ m คือ จำนวนของ codeword ใน packet

4. การแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของฮาร์โมนิกที่สามของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ที่มีผลต่อการส่งสัญญาณของ Bluetooth: หลักการวิเคราะห์

เราจะพิจารณาการออกแบบ time-slots โดยให้แต่ละ time-slot มีขนาด 625 ไมโครวินาที สำหรับการส่งสัญญาณของ Bluetooth จากมาสเตอร์ไปยังสเลฟ โดย slot เหล่านี้จะแบ่งแพ็กเกจออกเป็น 3 แบบ คือ 1 time-slot packet, 3 time-slot packet หรือ 5 time-slot packet แต่ละแพ็กเกจ และจะตั้งค่าเริ่มต้นที่เหมือนกัน โดยเริ่มจาก time-slot ที่เป็นเลขคู่ของการเชื่อมต่อระหว่างมาสเตอร์กับ สเลฟและเมื่อแพ็กเกจถูกส่งมันจะใช้ช่วงสัญญาณในในรูปแบบเดียวกัน ช่องสัญญาณของการกระโดดของความถี่จะสนับสนุนให้แพ็กเกจที่กำหนดโดยตำแหน่ง(address)ของมาสเตอร์ในพรีโคเน็ค(ULAP: Upper & Lower Address Part)

และโดยการเคลื่อนที่ของ time-slot ตามตำแหน่งของเพ็ทเกจ โดยช่องสัญญาณนี้จะถูกกำหนดโดยการ ออกแบบของจำนวนช่องสัญญาณจากตำแหน่งที่ 0 ถึง 78 (2402 ถึง 2481 MHz) ซึ่งจะถูกกำหนดโดย Bluetooth Core Specification V 1.0 B โดยแต่ละช่องสัญญาณที่จะมีการกระโดด (hopping channel) จะมี bandwidth เท่ากัน 1 MHz และอัตราการกระโดดของความถี่ (frequency-hopping) จะอยู่ที่ 1,600 hop ต่อ วินาที (โดยความกว้างของ time-slot จะเท่ากับ $1/1600 = 625$ ไมโครวินาที)ผลกระทบการแพร่กระจายของ คลื่น ไมโครเวฟที่เกิดจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของ carrier frequency ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz บนการ สื่อสารของ Bluetooth ระหว่างมาตรฐานกับสเลฟดังรูป 4 ซึ่งจะเป็นหลักสำคัญที่เราจะศึกษาต่อไป



รูปที่ 4 การรบกวนจากคลื่นไมโครเวฟจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ที่ตรงกับ ช่วงสเปคตรัมที่สามารถทำให้ช่วงสัญญาณการกระโดดของความถี่ในการสื่อสารของ Bluetooth ที่มีความไว ต่อการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Interference: EMI)

ฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ที่เรานำมาวิจัยจะมี 6 ตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ที่มีผลการรบกวนต่อการส่งข้อมูลของ Bluetooth ที่ Channel number ต่างๆ

Model	800 TX Mode (MHz)	3 rd Harmonic (GHz)	Interference on the channel
A	806.0125	2.4180	14-15
B	806.0625	2.4182	14-15
C	813.5125	2.4405	36-37
D	813.5625	2.4407	36-37
E	820.9875	2.4629	59-60
F	824.9875	2.4749	71-72

ค่าพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz เมื่อมีการแพร่กระจายออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz จะมีพลังงานที่มากพอที่จะเป็นสาเหตุในการรบกวนการสื่อสารของ Bluetooth™ โดยมันจะทำให้เกิดการสูญเสียแพ็กเกจ (packet loss) ในช่วงเวลาที่มีการทำงานของ Bluetooth (active time) ที่ตรงกันกับช่วงความถี่เดียวกันที่จะเกิดการรบกวนจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงในรูปของการรบกวนในช่องสัญญาณต่างๆ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการรบกวนการทำงานของ Bluetooth ที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดของเฟรมข้อมูล (Frame error rate: FER) ด้วยการ simulation ด้วยโปรแกรม Matlab จะแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์จากการจำลองการทดลองโดยได้ค่าเฉลี่ยของอัตราการผิดพลาดของ เฟรม (Frame error rate: FER)

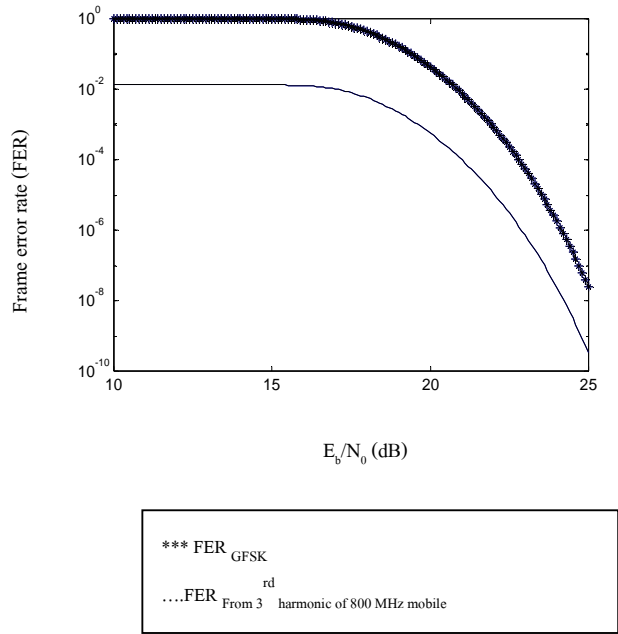
Model	Harmonic 3 rd	Frame error rate (FER) Simulation			Average FER
		1	2	3	
A	2.4180	0.0134	0.0133	0.0128	0.0132
B	2.4182	0.0101	0.0133	0.0136	0.0123
C	2.4405	0.0121	0.0068	0.0136	0.0108
D	2.4407	0.0159	0.0101	0.0199	0.0153
E	2.4629	0.0090	0.0064	0.0236	0.0130
F	2.4749	0.0127	0.0167	0.0133	0.0142

5.แบบจำลองการทดลองและผลลัพธ์

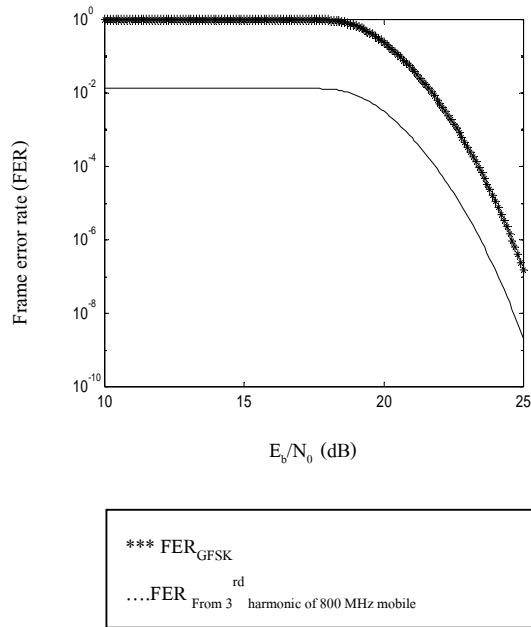
จากจุดนี้ เราจะมีค่าของ FERs สองชุดที่จะมาช่วยในการพิจารณา เหตุที่หนึ่งนั้นมาจากแพ็กเกจที่ทำการ hopping นั้นจะอยู่ในช่วงของความถี่ที่ได้รับผลกระทบจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz และ โดยที่เราจะนำมาพิจารณาร่วมกับค่าของ E_b/N_0 ของ GFSK ผลที่ตามมาคือเราจะได้ค่า FER รวมที่มาจากทั้งสองเหตุการณ์ (FER_{Total}) ที่มีความสัมพันธ์กับการรบกวน แพ็กเกจของ Bluetooth โดยฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz นั้นจะได้จาก

$$FER_{Total} = FER_{GFSK} * FER_{EMI Mobile Phone} \quad (8)$$

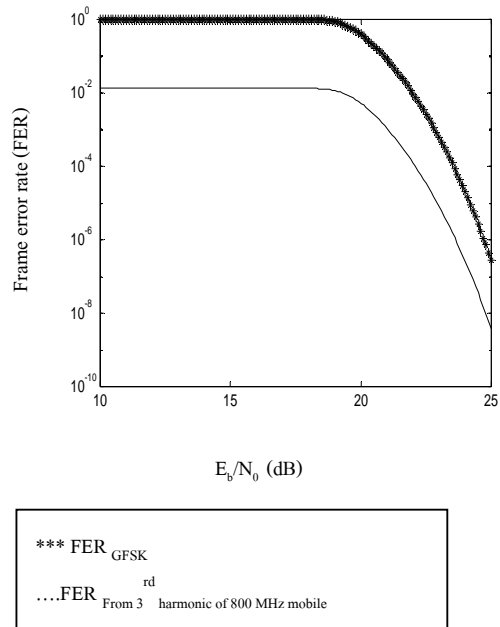
ผลการ Simulation จากตัวอย่างโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ชนิด A ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเป็นตัวอย่างที่เราจะนำมาศึกษาและแสดงผลการ simulation ที่ได้ในรูปแบบที่ 5-8 โดยจะแสดงอยู่ในรูปของค่า frame error rate (FER) กับค่าของ E_b/N_0



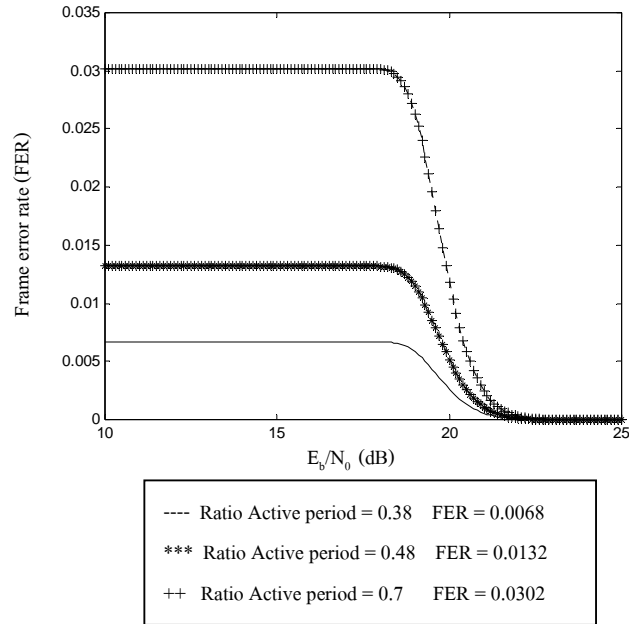
รูปที่ 5 Frame error rate on DM1 Bluetooth™ packet with $WT_b = 0.5$ and modulation index = 0.32 interfering by 3rd harmonic of 800 MHz mobile



รูปที่ 6 Frame error rate on DM3 BluetoothTM packet with $WT_b = 0.5$ and modulation index = 0.32 interfering by 3rd harmonic of 800 MHz mobile



รูปที่ 7 Frame error rate on DM5 BluetoothTM packet with $WT_b = 0.5$ and modulation index = 0.32 interfering by 3rd harmonic of 800 MHz mobile



รูปที่ 8 Frame error rate ของ Bluetooth™ packet ชนิด DM5 ด้วย $WT_b = 0.5$ และ modulation index = 0.32 โดยผลกระทบจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบ 800 MHz model A ณ ระดับการแพร่กระจายคลื่นที่ระดับ 38, 48 และ 70 %

6. สรุป

จากแบบจำลองการทดลองที่สร้างขึ้นนั้นผลการ simulation ที่ได้รับจากแบบจำลองเราจะพบว่าค่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่มาจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz (ประมาณ $800\text{MHz} \times 3 = 2.45\text{GHz}$) ที่ได้รับข้อมูลการวัดจากตัวอย่างโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ชนิดต่างที่มีการใช้และจำหน่ายอยู่เราจะพบว่าค่าฮาร์โมนิกที่ 3 ที่มีการแพร่กระจายออกจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz นั้นจะตรงกับช่วงการทำงานของ Bluetooth คือ ช่วงความถี่ระหว่าง 2.402-2.481 GHz และเมื่อนำค่าฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ที่ได้รับข้อมูลวิเคราะห์จะพบว่าค่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่มาจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz จะตรงกับการทำงานของช่องสัญญาณในการสื่อสารด้วย Bluetooth เฉพาะบางช่องสัญญาณ ซึ่งจะทำให้เกิดความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) กับการสื่อสารของระบบ Bluetooth โดยคุณสมบัติของ spectral ที่มีการปล่อยออกมาจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 800 MHz ที่ตรงกับในช่วง hopped frequencies ของการสื่อสารแบบ CDMA ของ Bluetooth นั้น มีผลทำให้เกิดความผิดพลาดของบิต (bit error) ซึ่งจะเป็นผลในการนำไปสู่การสูญเสียของแพ็คเกจ (packet loss) ในระหว่างการสื่อสาร และเป็นผลให้เกิดการผิดพลาดในการสื่อสารด้วย Bluetooth ได้